

# Evaluación de las estructuras de descarga de la presa La Barrancosa.

*Constanza Fernández Gorostidi<sup>1</sup>, Luis Bado<sup>1</sup>, Ramiro Diaz Ruiz<sup>1</sup>, Claudio A. Fattor<sup>1</sup> y Jorge D. Bacchiega<sup>1</sup>.*

<sup>1</sup> Instituto Nacional del Agua – Laboratorio de Hidráulica – Programa Hidráulica de Obras.

E-mail: conifernandezg@gmail.com

**RESUMEN:** A partir de la firma del convenio entre la UTE Represas Patagonia y el Instituto Nacional del Agua (INA), el Laboratorio de Hidráulica del INA ha llevado adelante el estudio del comportamiento de las obras hidráulicas incluidas en la presa La Barrancosa, sobre el río Santa Cruz. Para ello se desarrolló el proyecto y construcción de un modelo físico en escala 1:40, materializado en la Nave 1 de Grandes Modelos que posee el INA en Ezeiza.

El modelo general incluye el conjunto de obras hidráulicas, dadas por la estructura prevista para el desvío, el descargador de fondo, el vertedero con su cuenco disipador de energía, así como la central y el canal de restitución aguas abajo de la descarga del cuenco disipador y de la central, con sus correspondientes protecciones.

El estudio ha sido planteado en tres etapas. De manera sintética, cabe mencionar que estas etapas implican

Etapas 1: evaluación del comportamiento hidráulico de las obras de desvío y del proceso de transformación de la obra de desvío por medio del cierre de celdas.

Etapas 2: evaluación de las obras de descarga en fase operativa, lo cual comprende el vertedero y el cuenco disipador de energía, el descargador de fondo, y la operación de la central en forma aislada o simultánea con el vertedero.

Etapas 3: evaluación del comportamiento de la descarga a fondo móvil.

El presente informe tiene el propósito de exhibir y analizar algunos de los resultados obtenidos en las etapas 2 y 3, las cuales permiten establecer un diagnóstico integral del comportamiento de las estructuras hidráulicas para distintos caudales asociados a su rango operativo.

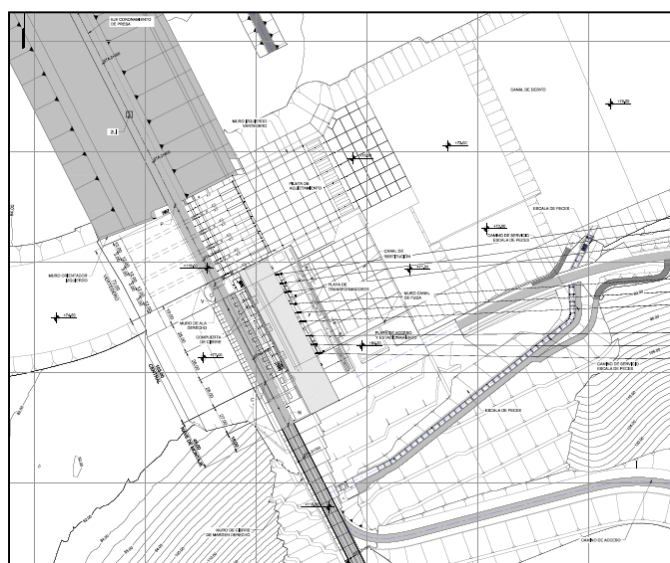
## DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS

El proyecto de la presa La Barrancosa prevé la construcción de la obra de cierre propiamente dicha y la disposición de un conjunto de estructuras hidráulicas temporarias y definitivas, además de la central de generación hidroeléctrica, las cuales quedan reflejadas en la Figura 1.

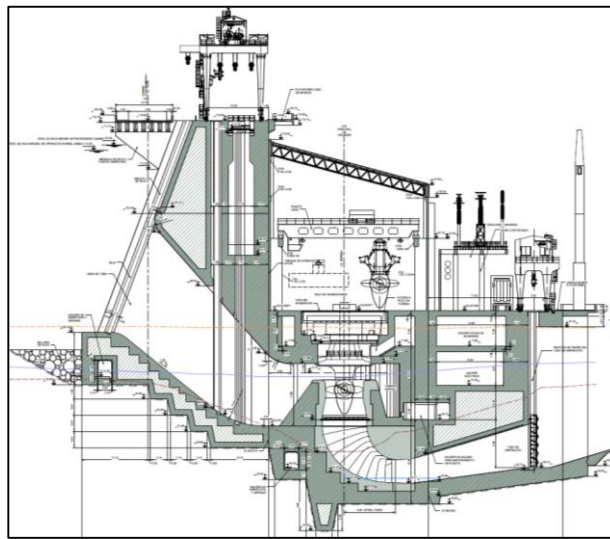


**Figura 1.- Ubicación obra.**

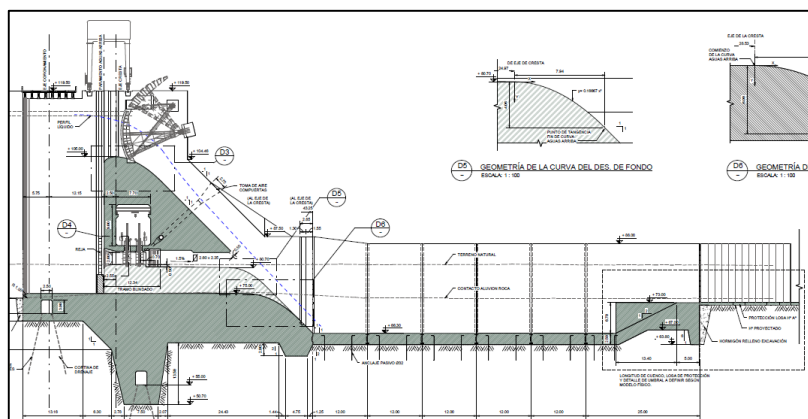
En las Figuras 2 a 4 se presentan las características generales de la estructura de desvío, del vertedero y cuenco disipador, de la central y la zona de restitución de vertedero y central, las cuales permiten caracterizar la obra.



**Figura 2.- Planta General.**



**Figura 3.-** Corte Longitudinal Turbina Central



**Figura 4.-** Corte Longitudinal Vertedero – Descargador de Fondo y Cuenco disipador

Para la ejecución de los ensayos correspondientes a las distintas fases de estudio, establecidas en las etapas descriptas previamente, se han debido establecer condiciones de borde para la correcta simulación de las condiciones del flujo. Estas condiciones establecen los valores de diseño y de funcionamiento vinculados a niveles de embalse, niveles de restitución y caudales.

**Tabla 1.-** Caudales y niveles de embalse de diseño.

| Estructura           | Q (m <sup>3</sup> /s) | Nivel de embalse (m) | Nivel Restitución (m) |
|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Desvío               | 2100                  | 84.55                | 80.49                 |
| Descargador de fondo | 700                   | 114.00               | 78.43                 |
| Central              | 1260                  | 114.00               | 79.39                 |
| Vertedero            | 4100                  | 114.00               | 82.50                 |

Para la realización de los ensayos se fijó el nivel de restitución correspondiente a cada condición de ensayo, situación que determina el nivel de descarga aguas debajo de las descargas de la central y del cuenco disipador del vertedero.

## OBJETIVO

El objetivo del presente informe es el de exhibir y analizar algunos de los resultados obtenidos en las etapas 2 y 3 del estudio.

De la etapa 2 se presentan y analizan los resultados de la evaluación del comportamiento del vertedero y cuenco disipador tanto aguas arriba en la zona de aducción como aguas abajo en el canal de restitución.

De la etapa 3 se analizan los resultados de los ensayos de diagnóstico del comportamiento de las protecciones aguas abajo del cuenco disipador en la zona del canal de restitución.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### *1) Evaluación de las obras de descarga en fase operativa*

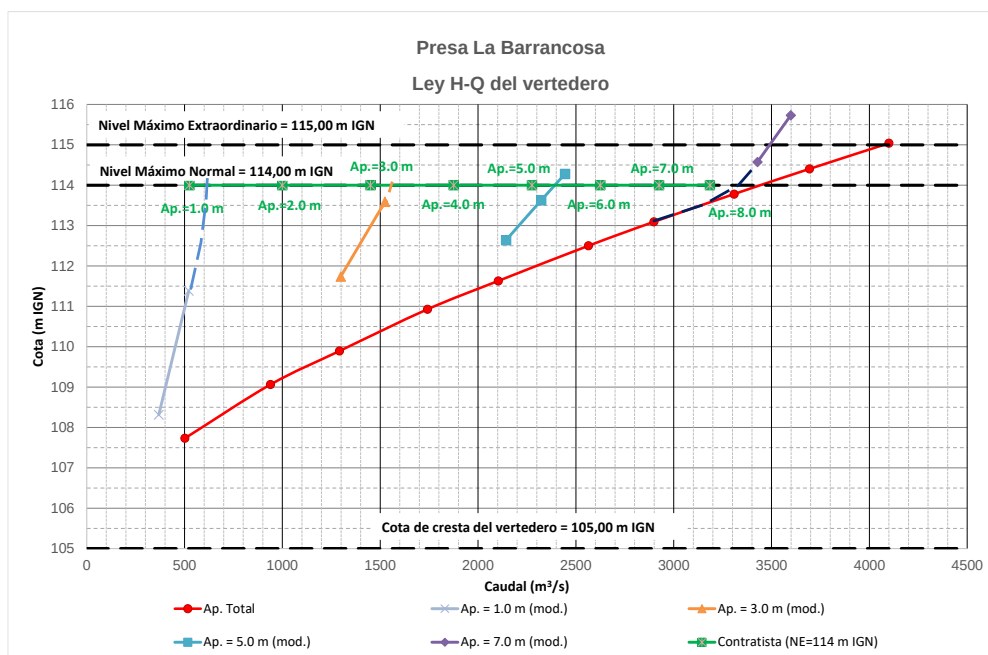
La presente etapa de estudio contempla la evaluación de las obras de descarga en su fase de operación, lo que implica el análisis de las siguientes estructuras:

- Vertedero y cuenco disipador de energía.
- Descargador de fondo
- Central operando de manera aislada o simultánea con el vertedero.

En este informe se detallarán los resultados evaluados sobre el vertedero y cuenco disipador, para los cuales se analizaron las condiciones del flujo, ya sea de aproximación o de salida y se efectuaron la valoración de la configuración del flujo, campos de velocidades, niveles líquidos y presiones.

En relación con la ley de descarga del vertedero con control de compuertas, se han relevado puntos en correspondencia con aperturas de 1 m, 3 m, 5 m y 7m, analizando fundamentalmente valores de caudales que arrojan niveles de embalse en el entorno de la cota 114 m IGN.

Los ensayos realizados arrojan los resultados que se visualizan en la Figura 5, en la que se vuelcan los valores experimentales y los estimados por el Contratista.



**Figura 5.-** Ley de descarga del vertedero con control de compuertas

### *Comportamiento hidráulico del vertedero para $Q=4100 \text{ m}^3/\text{s}$*

La caracterización del comportamiento hidráulico del vertedero y su estructura de disipación de energía es un tema de suma importancia en especial con la erogación del caudal máximo de  $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ . En los siguientes puntos se procederá a efectuar un análisis de las condiciones de aproximación, de la estructura de control y el cuenco disipador de energía, y de las condiciones de salida, analizando niveles líquidos, velocidades y presiones.

#### *a. Condiciones de aducción al vertedero*

La caracterización de las condiciones de aducción al vertedero se realizó por medio de la visualización del flujo de llegada y mediante la medición de velocidades en el entorno cercano a la superficie libre. La fotografía siguiente permite observar el funcionamiento de la aducción al vertedero y la identificación de algunas trayectorias y líneas de corriente extrema.



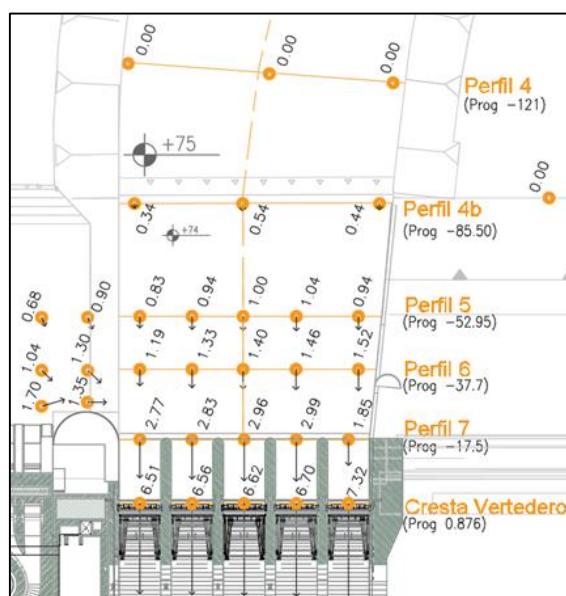
$Q=4100 \text{ m}^3/\text{s}$

$T.R.=10000 \text{ años}$

*Aducción Vertedero*

La Figura 6 ilustra las velocidades superficiales alcanzadas en la zona de aproximación. Dicha figura permite apreciar el incremento de la velocidad hacia el perfil del vertedero, con valores que rondan 0.5 m/s en el perfil 4b a magnitudes cercanas a 7 m/s sobre la cresta del vertedero.

En cuanto a la distribución transversal de los valores relevados, el perfil 7 en particular registra una magnitud más reducida en correspondencia con el vano 5, lo que de alguna manera se encuentra en correspondencia con la configuración del flujo observada en las fotografías previas. De todas maneras, se observa un patrón relativamente uniforme en la distribución de velocidades.



**Figura 6.-** Le Velocidad superficial de aproximación al vertedero -  $Q=4100 \text{ m}^3/\text{s}$



b. Evaluación de la estructura de control y disipación de energía

b.1. Visualización del escurrimiento

La siguiente fotografía permiten ver las características del flujo desde la sección de control que se establece sobre el perfil vertedero hacia aguas abajo, el cuenco disipador de energía.



- Se presentan variaciones de nivel entre los valores medios y los extremos que no llegan a exceder en ningún caso la cota de coronamiento de los muros laterales del cuenco.
- Se aprecia la importancia de la estructura dentada final en el proceso de estabilización del resalto.

b.2. Niveles líquidos

Se ha efectuado una evaluación de los niveles líquidos mínimos, medios y máximos en el interior del cuenco, tomando como referencia el muro de margen izquierda, lo cual queda reflejado en la Figura 7.

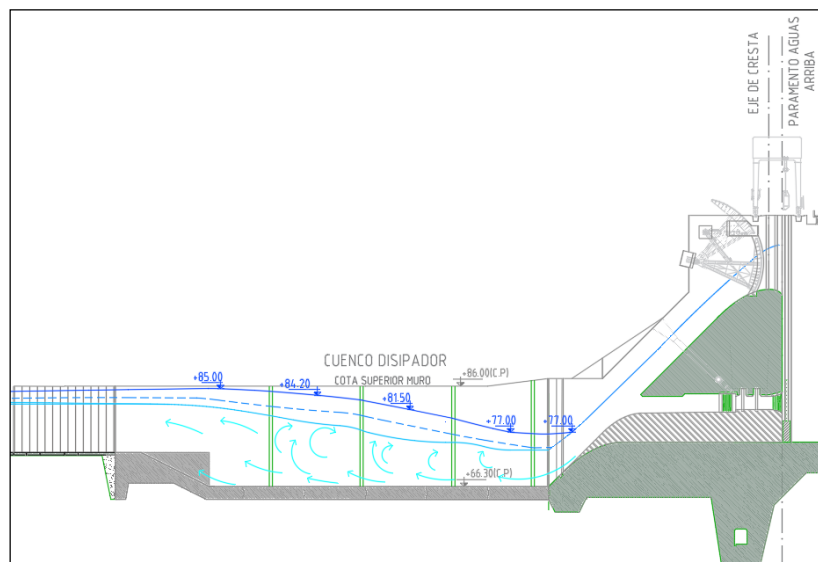


Figura 7.- Perfil hidráulico en el cuenco disipador –  $Q= 4100 \text{ m}^3/\text{s}$

### b.3. Determinación de presiones medias y fluctuantes

En relación con el campo de presiones medias y fluctuantes en el cuenco dissipador de energía, se procedió a un barrido en distintos sectores del cuenco. Una muestra inicial de los resultados alcanzados surge del relevamiento realizado en el eje del vano 3, el cual constituye el eje medio longitudinal del conjunto vertedero – cuenco, y de las tomas alineadas en correspondencia con la pila que separa los vanos 3 y 4 del vertedero. Estos resultados se ven reflejados en las figuras 8 y 9.

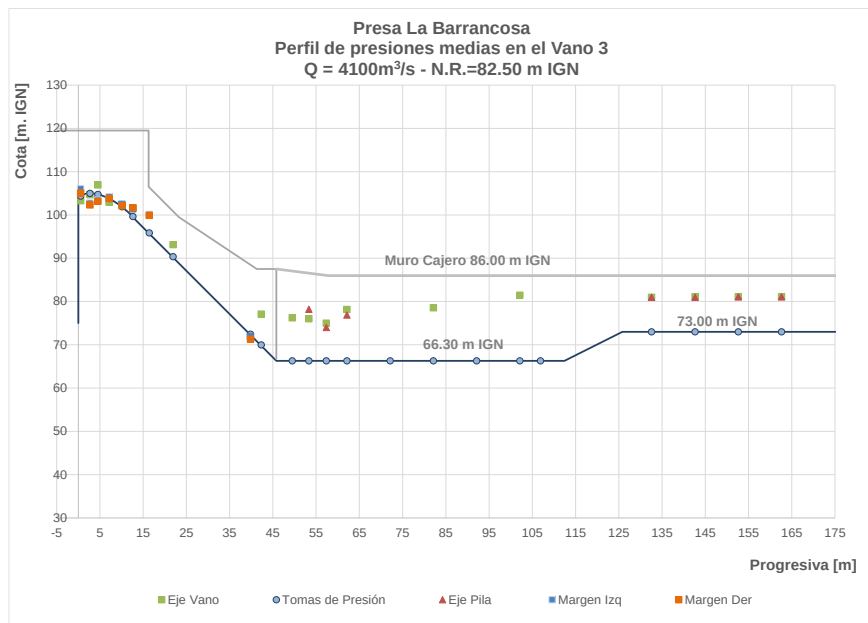


Figura 8.- Perfil de presiones en el vertedero – Vano 3 – Q= 4100 m³/s

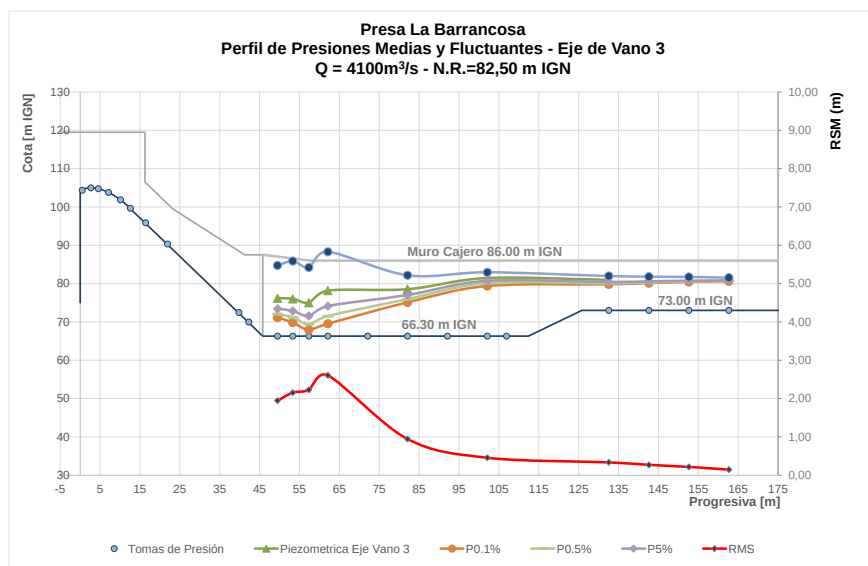


Figura 9.- – Perfil de presiones en la solera del cuenco - Eje de vano 3 – Q= 4100 m³/s



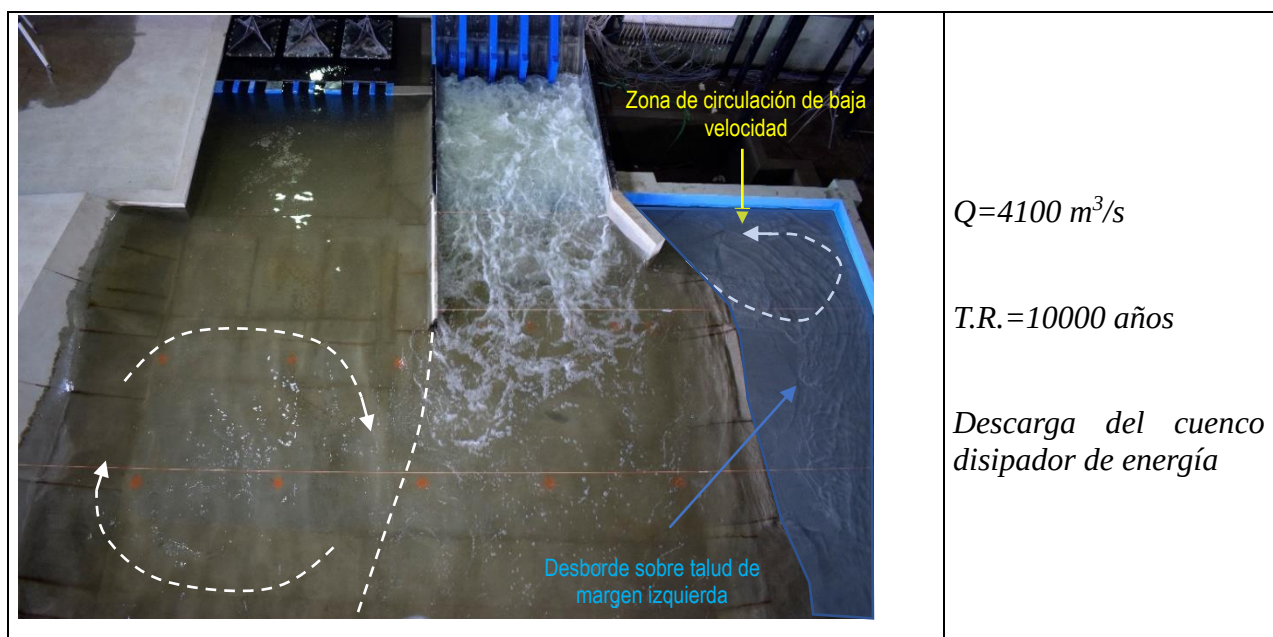
La lectura de las figuras y tablas anteriores permite apreciar que:

- No se presentan zonas con riesgos de cavitación.
- Los valores de intensidad de turbulencia, interpretados mediante la magnitud del valor medio cuadrático (RMS) presentan un máximo en el entorno del tercio inicial de la longitud del resalto, decayendo hacia aguas abajo.
- Los valores de RMS aguas abajo de la sección final del cuenco evidencia una caída consistente con la tasa de disipación de energía alcanzada en la extensión prevista de cuenco, con una energía residual que es básicamente cinética y en menor medida derivada de la turbulencia residual.

c. *Condiciones hidráulicas aguas abajo del cuenco dissipador*

En esta fase de estudio a lecho fijo, se ha evaluado la configuración del flujo y el campo de velocidades aguas abajo del cuenco dissipador de energía, lo que permite identificar y caracterizar las condiciones de descarga para esta condición en particular.

La fotografía permite apreciar algunas de estas características en el entorno cercano de la sección final del cuenco.



La observación directa del funcionamiento hidráulico permite establecer algunos aspectos que se resumen a continuación:

- Los niveles líquidos asociados a un caudal de  $4100 \text{ m}^3/\text{s}$  exceden la cota de terreno natural sobre margen

izquierda del canal de restitución, lo que conlleva a generar una zona de afectación que interesa el propio pie de presa sobre dicha margen. En ese marco, resulta conveniente analizar la posible materialización de una sobrelevación de la cota de desborde de la margen izquierda que evitaría la interacción del flujo con el pie de presa.

- Se aprecia una zona de separación del flujo principal respecto del muro ala de margen izquierda, el cual se extiende aguas abajo del extremo final de dicho muro cajero.
- Asimismo, se aprecia una expansión del flujo a partir del extremo aguas abajo del muro divisorio central – vertedero, lo que da lugar a una caída de velocidades hacia margen derecha y a la formación de una zona de recirculación de baja velocidad.

## 2) Evaluación de las protecciones aguas abajo del cuenco dissipador de energía

El proyecto presentado por la Contratista contempla la inclusión de protecciones aguas abajo del cuenco dissipador de energía como de la descarga de la central, las que deben ser evaluadas a los efectos de establecer su comportamiento frente a distintos caudales erogados por el vertedero. A tal efecto, se ha procedido a la representación de estas medidas de protección en el modelo físico, con el alcance previsto y con material granular representativo de los distintos tramos. Luego, se desarrollan dos ensayos correspondientes a la operación del vertedero con 2100 m<sup>3</sup>/s y con 4100 m<sup>3</sup>/s, cuyas condiciones quedan definidas en la Tabla 3.

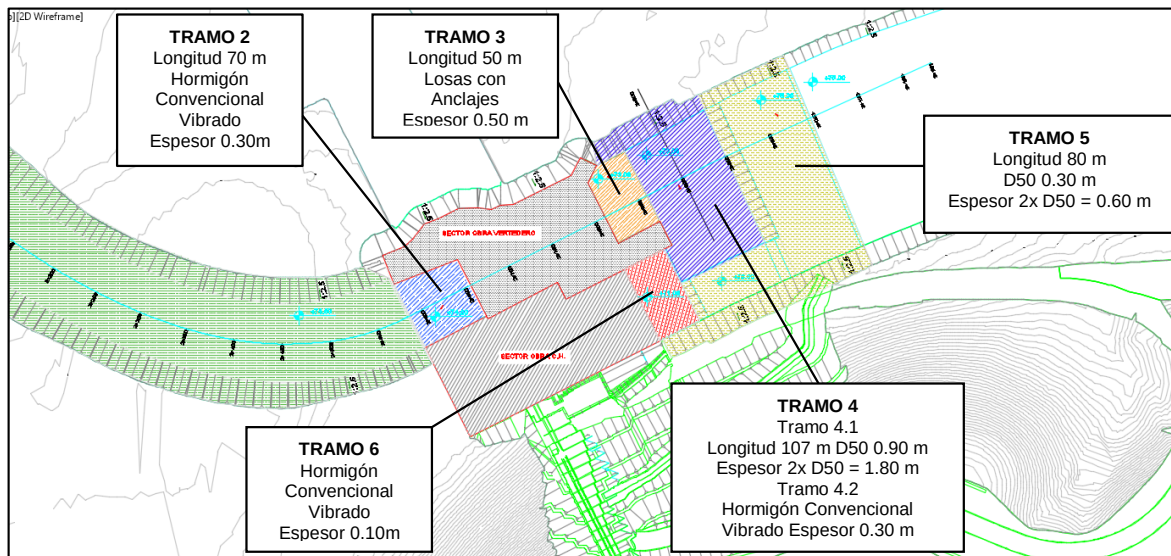
**Tabla 3.- Escenarios ensayados para evaluación de protecciones.**

| Esc. | Q<br>VERTEDERO<br>(m <sup>3</sup> /s) | N.E.<br>(m IGN) | N.R.(m IGN)<br>(Restitución central y<br>vertedero) |
|------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| E3.1 | 2100                                  | 114.00          | 80.49                                               |
| E3.2 | 4100                                  | 115.04          | 82.50                                               |

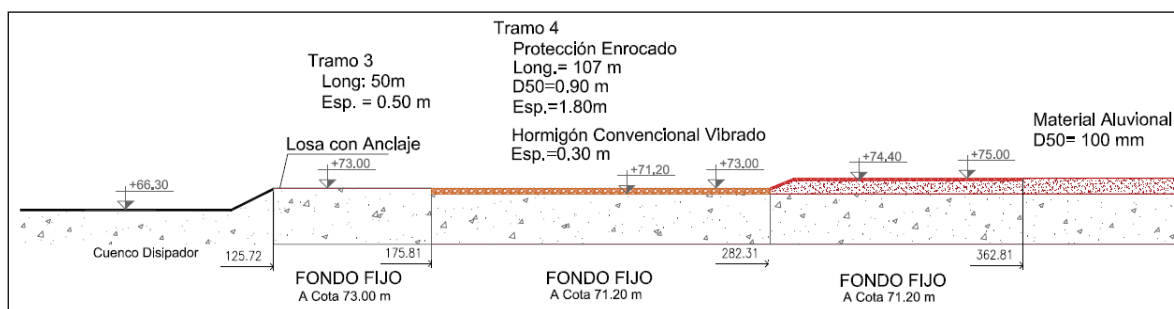
## Descripción de las protecciones e implementación en modelo físico

El proyecto entrega por el Contratista contempla distintas protecciones, de acuerdo a los sectores del canal de restitución. El plano de protecciones permite identificar las siguientes tipologías, las que quedan reflejadas en la Figura 10 y 11:

1. Losas con Anclajes (Tramo 3 según plano proyectista). Longitud= 50 metros. Espesor=0.50m
2. Enrocado D<sub>50</sub> = 0.90 m (Tramo 4), Espesor 2 x D<sub>50</sub> = 1.80 m. Longitud 50 metros.
3. Enrocado D<sub>50</sub> = 0.30 m (Tramo 5), Espesor 2 x D<sub>50</sub> = 0.60 m. Longitud 80 metros.



**Figura 10.-** Protecciones en canal de desvío y de restitución - Planta



**Figura 11.-** Implementación de protecciones en el modelo físico – Corte Longitudinal

### *Evaluación de las protecciones para $Q= 2100 \text{ m}^3/\text{s}$*

Se realizó el ensayo destinado a evaluar la estabilidad de las protecciones aguas abajo de las obras de descarga para el caudal de  $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual está asociado a una recurrencia de 25 años.

Las siguientes fotografías permiten apreciar el comportamiento observado durante el ensayo, así como las condiciones finales observadas tras su culminación.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><math>Q=2100 \text{ m}^3/\text{s}</math></p> <p><math>T.R.=25 \text{ años}</math></p> <p><i>Evaluación de la estabilidad de las protecciones.</i></p> <p><i>Vista desde aguas abajo</i></p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Las fotografías permiten plasmar que, ante la erogación del caudal de  $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ , las protecciones contempladas en el proyecto no se ven alteradas, sin que inclusive se produzcan erosiones sobre el material representativo del material aluvional.

#### *Evaluación de las protecciones para $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$*

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos del ensayo anterior, se procedió posteriormente a la realización del ensayo para un caudal erogado por vertedero de  $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual representa el caudal de punta de una crecida de recurrencia decamilenaria.

Las siguientes fotografías permiten apreciar el comportamiento observado durante el ensayo, en distintos instantes de tiempo.

|                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><math>Q=4100 \text{ m}^3/\text{s}</math></p> <p><math>T.R.=10000 \text{ años}</math></p> <p><i>Evaluación de la estabilidad de las protecciones.</i></p> <p><math>T_{\text{MODELO}}=360</math><br/>minutos</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



|                                                                                   |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><math>Q=4100 \text{ m}^3/\text{s}</math></p> <p><math>T.R.=10000 \text{ años}</math></p> <p><i>Erosión final</i></p> <p><i>Vista desde aguas abajo</i></p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

La observación de las fotografías permite apreciar:

- No hay procesos de remoción del material de enrocado de  $D_{50}=0.90 \text{ m}$  dispuesto aguas abajo de la losa de protección a la salida del cuenco.
- El escurrimiento de descarga del vertedero provoca erosiones en un sector acotado del ancho total del canal de restitución, centrado en la zona de mayor velocidad del flujo. Esto produce el movimiento de una parte del material de protección previsto en el tramo 5, con material de protección característico de  $D_{50}=0.30 \text{ m}$ . La erosión registrada presenta un ancho máximo de 86 metros y una longitud de aproximadamente 100 metros.
- En ese sector, el flujo también provoca erosiones del material aluvional dispuesto debajo de la doble capa de enrocado de  $D_{50}=0.30 \text{ m}$ , siempre confinado al sector de máxima velocidad del flujo de descarga del vertedero.
- En consecuencia, y de acuerdo a lo observado, los procesos erosivos mencionados se han presentado solamente en la solera del canal, en la región de mayores velocidades relevadas en la Etapa 2, sin afectar los taludes laterales del canal de restitución.

## CONCLUSIONES

*Respecto del funcionamiento del vertedero funcionando en forma aislada, se pueden efectuar los siguientes comentarios*

- Se comprobó la ley de descarga, tanto en la operación libre como en el funcionamiento controlado con compuertas. De este registro se obtuvo con la erogación del caudal máximo (4163 m<sup>3</sup>/s) un nivel de embalse de 115.16 m IGN, valor levemente superior al estimado en la fase de proyecto.
- Las condiciones de aducción al vertedero son aceptables observándose algunas condiciones particulares en la aducción del estribo de margen izquierda. Estas condiciones de aproximación no producen cambios en el comportamiento de los distintos vanos que mantienen un adecuado nivel de uniformidad.
- Las presiones medias registradas en el cuerpo del vertedero demuestran que no existen riesgos de cavitación por valores negativos excesivos.
- Asimismo, se observa una notoria caída de la intensidad de turbulencia en la descarga aguas abajo del cuenco, situación que pone de manifestó la eficiencia del mismo para lograr la disipación de energía remanente al pie del vertedero.
- Como síntesis de lo expresado, las obras del vertedero y su cuenco disipador de energía presentan un adecuado comportamiento hidráulico, no resultando necesario el planteo de medidas correctivas.

*Respecto a la evaluación de las protecciones aguas abajo del cuenco disipador se pueden efectuar las siguientes conclusiones:*

- El ensayo realizado con el caudal de 2100 m<sup>3</sup>/s no muestra evidencia de erosión de ningún tramo de las protecciones previstas.
- La descarga de un caudal de 4100 m<sup>3</sup>/s provoca la falla de la protección de D50=0.30 m en un sector situado aguas abajo del cuenco, con un área de afectación de aproximadamente 4300 m<sup>2</sup>, en la que se alcanza la remoción del material aluvional hasta alcanzar la cota 71.20 m IGN que establece un fondo fijo en el modelo físico.
- No se aprecia erosiones en los tramos de protección enfrentados a la salida de la central ni en los taludes del canal del canal de restitución.

Por lo expuesto, y teniendo en cuenta que el objetivo de las protecciones es resguardar a las estructuras de descarga, particularmente el cuenco disipador de energía, se puede concluir que los diseños establecidos en el proyecto cumplen con este requerimiento, pudiendo considerarse un análisis de optimización que restrinja los volúmenes y alcance de las protecciones a las estrictamente requeridas para garantizar la protección de las obras de descarga.